通过对视觉错觉的分析来了解视觉认知过程

黄来友*　E-mail: huangly@nju.edu.cn

南京大学电子科学与工程学院，南京，210003

摘　要 为了揭开视觉认知之谜，本研究仿电风扇，研制成功“WT5518 视觉特性测试仪。”该测试仪能使人产生多种视觉错觉。通过对错觉的分析，本研究有了如下的发现：视觉由低速视觉和高速视觉组成。在这两个子系统中，视觉大脑分别对高、低速视路传来的信息进行格式化处理。但是，视觉大脑不能识别这些信息。意识分别从高、低速视觉大脑摄取信息，通过与已知认知进行比较，分别产生新的高、低速视觉认知。这两个视觉子系统相互独立，互不干涉。在某些速度下，这两个子系统有交集。视觉具有两种状态，即：“拍摄态”和“凝视态。”当视觉处于“拍摄态”时，意识同时从高、低速视觉大脑摄取并识别信息。这时，人能看见眼前的场景。当视觉处于“凝视态”时，意识不摄取视觉信息。这时，人便看不见眼前的场景。因此，视觉信息最终是离散的，是有间隙的。“凝视态”时，由于眼识凝视着前面拍摄的信息，因此，人感觉不到视觉信息的间隙。视觉“拍摄态”和“凝视态”的交替出现，使视觉具有了频率特性。意识采集高、低速视觉信息的频率是 100 Hz。人们的视觉认知行为是同步的。即：看物体时，人们的视觉同时处于视觉“拍摄态”或“凝视态。”高、低速视觉都会产生视觉错觉。不过，只有高速视觉会产生视觉余像。本研究为认知科学研究提供了基本原理。

关键词 大脑，　意识，　视觉，　视觉错觉，　认知科学

分类号 B842

Understanding the cognitive process of the human visual system by analysing illusions generated using a visual characteristics tester

Laiyou Huang

School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, China

Abstract: Despite advances in vision research, how people see objects remains unclear. In this study, a WT5518 Visual Characteristics Tester imitating an electric fan was developed and used to investigate visual cognition. The tester could induce various visual illusions. Analysis of these visual illusions revealed that the human visual system consists of high- and low-speed visual subsystems, in which the visual

brain processes visual information from the high- and low-speed visual pathways, and consciousness recognizes visual information from the visual brain. The two subsystems are independent of each other and do not interfere with each other, however, at some speeds, there is an intersection between the two subsystems. Furthermore, human vision comprises two states, i.e. the visual “filming state,” and “staring state.” During the “filming state,” consciousness captures and recognizes images from the high- and low-speed visual brain simultaneously, so, at this moment the individual can see the surrounding scenes. During the “staring state,” consciousness does not capture any images, thus, at this moment the individual cannot see the surrounding scenes. Ultimately, visual information is discrete and intermittent. In the “staring state,” vision stares at the images taken previously, therefore, the intermittence of visual information can hardly be perceived. Alternation of the two visual states endows human vision with frequency characteristics. The frequency at which consciousness samples visual information is 100 Hz. The cognitive behavior of people’s vision is synchronous. Both high- and low-speed vision subsystems can create illusions but only high-speed vision can create afterimages. This study provides a foundation for cognitive research.

Keywords: Vision, Brain, Consciousness, Neuroscience, Cognition

1 简介

依据解剖学和生理学的研究来看，人的视觉系统由眼睛、视路系统和视觉大脑三部分组成。其中，视路系统中有三个相互分离，相互独立的视路。它们分别传送、处理视网膜上同一个图像的不同特征到对应的视觉大脑。Magnocellular 视路起始于视网膜杆状光感受器，投射到膝状体外侧那组大细胞组成的细胞层。Parvocellular 视路起始于视网膜锥形光感受器，投射到膝状体外侧那组中大细胞组成的细胞层[4,5,6]。Koniocellular 视路起始于 Bistratified 视网膜神经节，投射到膝状体外侧那组小细胞组成的细胞层[7,8]。Magnocellular 视路选择传送物体的深度和运动特征。Parvocellular 视路选择传送物体的形状和颜色。另外，颜色、形状和运动是在不同的时间被感受的。并且，颜色是最先被感受的[9,10,11]。这个现象说明，在人的视觉中有一个分层次的感知缓冲组织。她对同一个物体的不同特征进行相应的延迟，使异步信息成为同步信息。然后，大脑将这些信息绑定在一起，给我们一个整体的视觉感受[12,13,14]。

一些科学家发现：大脑组织的部分受损会导致人部分视觉功能的丧失。这一现象似乎证明人的大脑不但处理接收到的各种视觉信息，而且，大脑还负责识别这些信息[15,16,17]。

也有许多科学家认为：意识在人的视觉认知中扮演着重要的角色[18,19]。然而，没能提供足够的证据。

通过对视觉错觉的分析，本研究发现了意识识别视觉信息的一般规律。

2 实验

2.1 参试者和实验设备

研究伦理协议已得到南京大学科学与技术伦理委员会临床医学伦理分委会批准（OAP20230829001）。所有实验都是依据相关指引和规章进行的。所有参试者均提供了书面知情同意书。

所有参试者分成 8 组（每组 9 人）。参试者在测试仪的前面 1 米到 6 米的范围内，或坐、或站都可以。每一个实验后，至少有一名参试者参加下一组实验。

为了揭开视觉认知之谜，本研究仿电风扇，研制成功“WT5518 视觉特性测试仪。”该测试仪内置一个调速电机系统。电机的轴上有一只法兰，法兰上可安装不同形状、不同数量、不同颜色的实验叶片。应用遥控器可调控电机的转速。通过改变法兰上叶片的数量、形状，调控电机的转速，该测试仪能使人产生多种视觉错觉。默认为顺时针方向旋转。通过对视觉错觉的分析，本研究发现了视觉认知的基本原理。

2.2 实验

实验一：旋转叶片诱发的视觉现象

在“WT5518 视觉特性测试仪”的法兰上，安装 12 片长方形白色叶片，互成 30° 夹角。法兰的直径（D）= 8 cm；叶片长（L）= 11.3 cm；叶片宽（W）= 1.3 cm，如图 1 所示。随着电机转速的改变，旋转的叶片会诱发一系列的视觉现象。

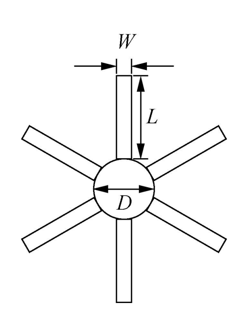


图 1 叶片组示意图

法兰的直径（D）、叶片的长度（L）和叶片的宽度（W）是可变的。叶片的数量也是可变的。

(a)、当电机转速在 0 – 62.5 rpm 时,所有参试者看见 12 个相同的长方形白色叶片沿顺时针方向旋转。转速越慢，叶片越清晰。当电机转速为 62.5 rpm 时，长方形白色叶片的外围部分开始模糊。

(b)、当电机转速为 125 rpm 时, 12 个长方形白色叶片的外围部分消失不见。不过，仍能看见叶片的内围部分在作顺时针旋转。这时，所有参试者还会看见 48 个相同的扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。它们的夹角为 7.5°。48 个扇形叶片的内围部分消失不见。另外，12 个长方形白色叶片的内围部分总是与 48 个扇形叶片中一组 12 个扇形叶片的外围部分相重叠。

(c)、当电机转速设定为 500 rpm 时，实际转速与设定转速有时会有一点误差。当实际转速等于设定转速时，即：500 rpm，这时，所有参试者看见夹角为 30° 的 12 个相同的扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。并且，参试者所看见的 12 个扇形叶片固定的角度是相同的，如 Video 1 所示。

当实际转速略高于 500 rpm 时，所有参试者看见 12 个扇形叶片沿顺时针方向慢慢地旋转，如 Video 2 所示。

当实际转速略低于 500 rpm 时，所有参试者看见 12 个扇形叶片沿逆时针方

向慢慢地旋转，如 Video 3 所示。

由于电机实际转速不可能一直等于设定转速，因此，参试者一会儿看见高速旋转的叶片不转。一会儿看见叶片沿顺时针方向慢慢地旋转。一会儿看见叶片沿逆时针方向慢慢地旋转。

在上面的三种情况中，12 个白色长方形叶片从视觉中完全消失。

不管叶片如何旋转，参试者所见的结果是相同的。

(d)、当电机转速为 501 rpm 沿顺时针方向高速旋转时，所有参试者看见 12 个扇形叶片沿顺时针方向慢慢地旋转，如 Video 2 所示。

(e)、当电机转速为 499 rpm 沿顺时针方向高速旋转时，所有参试者看见 12 个扇形叶片沿逆时针方向慢慢地旋转，如 Video 3 所示。

实验二：高速旋转叶片诱发的视觉余像

在“WT5518 视觉特性测试仪”的法兰上，安装一片长方形白色叶片，再在 180°的方向安装一片形状和质量都相同的黑色叶片，作为配重。法兰的直径（D）= 8 cm；叶片长（L）= 11.3 cm；叶片宽（W）= 3.0 cm，如图 1 所示。由于背景为黑色，叶片高速旋转时，观察者只能看见白色叶片，看不见黑色叶片。因此，这是个单叶片实验系统。

当电机转速为 750 rpm 时，虽然只有 1 片长方形白色叶片在旋转，观察者却能看见 8 个扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。它们之间的夹角为 45°。观察者产生了视觉余像。

实验三：高速旋转叶片诱发的视觉错觉

在“WT5518 视觉特性测试仪”的法兰上，安装 6 片长方形白色叶片，互成 60°夹角。法兰的直径（D）= 8 cm；叶片长（L）= 11.3 cm；叶片宽（W）= 2.0 cm，如图 1 所示。

当电机分别以 1000、500、333.3.、250、200、166.7、142.9 和 125 rpm 转速顺时针方向旋转时，观察者看见 6、12、18、24、30、36、42 和 48 片扇形叶片分别固定在不同的角度，不旋转。它们之间的夹角分别为 60°、30°、20°、15°、12°、10°、8.6°和 7.5°。

实验四：高、低速视觉认知行为同步的研究

在“WT5518 视觉特性测试仪”的法兰上，安装 48 片长方形白色叶片。法兰的直径（D）= 8 cm；叶片长（L）= 11.3 cm；叶片宽（W）= 0.4 cm，如图 1 所示。当电机的转速为 125 rpm 时，所有参试者同时看见 48 个长方形白色叶片和 48 个扇形叶片。并且，它们完全重叠，分别固定在 48 个角度，不旋转，如 Video 4 所示。

实验五：低速旋转叶片诱发的视觉错觉

在“WT5518 视觉特性测试仪”的法兰上，安装 100 片长方形白色叶片，互

成 3.6° 夹角。法兰的直径（D）= 13 cm；叶片长（L）= 8.8 cm；叶片宽（W）= 0.4 cm，如图 1 所示。随着电机转速的改变，旋转的叶片会诱发一系列的视觉现象。

(a)、当电机的转速为 60 rpm 时，所有参试者看见 100 个长方形白色叶片分别固定在 100 个角度，不旋转，如 Video 5 所示。

(b)、当电机的转速为 62 rpm 沿顺时针方向旋转时，所有参试者看见 100 个长方形白色叶片沿顺时针方向慢慢地旋转。

(c)、当电机的转速为 58 rpm 沿顺时针方向旋转时，所有参试者看见 100 个长方形白色叶片沿逆时针方向慢慢地旋转。

文章中的所有视频是在测试仪前 0.6 m 处，以 30 fps 的频率拍摄的。一些视频诱发的图像与测试仪诱发的图像相同，这些视频用作演示。另一些视频诱发的图像与测试仪诱发的图像不同，这些视频不能用作演示。

3 结果与讨论

3.1 视觉由低速视觉子系统和高速视觉子系统组成，意识对视觉信息进行识别

实验一(a)中，叶片处于低速旋转中，参试者看见 12 个长方形白色叶片。因此，看见 12 个长方形白色叶片的视觉应该是低速视觉。

实验一(c)中，叶片处于高速旋转中，参试者看见 12 个扇形叶片。因此，看见 12 个扇形叶片的视觉应该是高速视觉。

实验一(b)中，叶片处于中速旋转中，所有参试者同时看见 12 个长方形白色叶片和 48 个扇形叶片。实验一（b）中 12 个长方形白色叶片的形状与实验一（a）中 12 个长方形白色叶片的形状相同。由此可见，实验一（b）中的长方形白色叶片是低速视觉所见。实验一（b）中 48 个扇形叶片的形状与实验一（c）中 12 个扇形叶片的形状相似，面积是实验一（c）中扇形叶片的四分之一，数量是实验一（c）中扇形叶片的四倍。由此可见，实验一（b）中的扇形叶片是高速视觉所见。参试者同时看见低速视觉信息和高速视觉信息，表明人的视觉由两个视觉子系统组成。即：由只能看见静止或低速运动的长方形白色叶片的低速视觉和只能看见高速运动扇形叶片的高速视觉组成。

另外，实验一（c）中，叶片是连续旋转的，大脑收到的视觉信息应该是连续的。但是，所有参试者看到的视觉信息是不连续的。因此，视觉信息的终点不是大脑，而是人的高级精神活动--意识[1，2，3，20，21]。

依据上面的分析和视觉研究的成果，本研究得出如下的结论：

眼睛、Parvocellular 视路系统及大脑的一部分组成人的一个视觉传感器。Parvocellular 视路系统由中大细胞组成，它对高速运动信息敏感，对静止和低速运动信息不敏感。Parvocellular 视路系统就像一个带通滤速器，只将在一定范围内的高速运动信息传输到对应的视觉大脑，阻止静止和低速运动信息通过。因此，该传感器是高速视觉传感器。该传感器与意识一起组成人的高速视觉。

眼睛、Magnocellular 视路系统及大脑的另一部分组成人的另一个视觉传感器。Magnocellular 视路系统由较大细胞组成，它对静止和低速运动信息敏感，对高速运动信息不敏感。Magnocellular 视路系统就像一个低通滤速器，只将静止和低速运动信息传输到对应的视觉大脑，阻止高速运动信息通过。因此，该传感器是低速视觉传感器。该传感器与意识一起组成人的低速视觉。

实验一（b）还表明：高速视觉和低速视觉是相互独立的，互不干涉的。在某些速度下，这两个视觉有交集。

在这两个视觉子系统中，眼睛将光信息转换为生物电信号。生物电信号中的高速视觉信息通过 Parvocellular 视路系统传送到高速视觉大脑。低速视觉信息通过 Magnocellular 视路系统传送到低速视觉大脑。视觉大脑以固定的算法分别对高、低速视觉信号进行格式化处理。但是，视觉大脑不能识别高、低速视觉信息。意识分别从高、低速视觉大脑中摄取信息，并将摄取的信息与已知认知进行比较，分别产生新的高、低速视觉认知。因此 没有意识，就没有视觉[1, 2, 3, 22]，如图 2 所示。

视觉系统由两个视觉子系统组成也得到了临床证据的支持。有一种运动盲症（由于大脑皮层 V_5 区受到损伤而引起的）。他们能看见静止的物体，但看不见运动的物体。还有些患者受到不可感知形态的困扰（常伴随有色盲症，即只能看到灰影）。这些患者在物体处于静止时，识别它们非常困难，但当这些物体动起来，看它们就没有或几乎没有困难了。

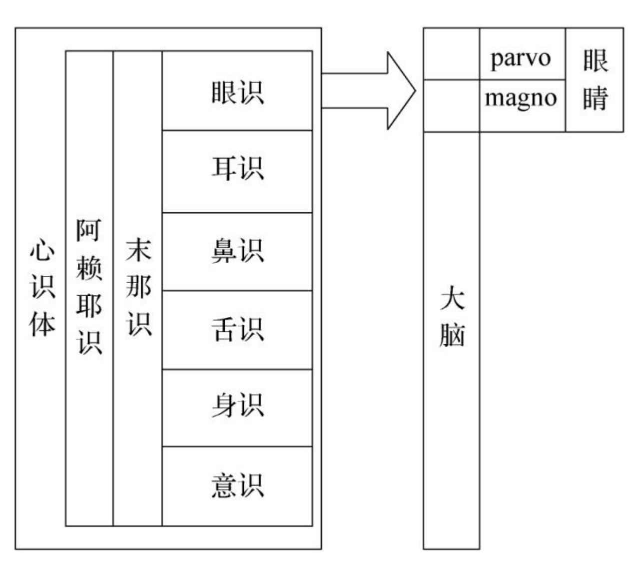


图 2 意识查询图

意识对与眼睛、耳朵、鼻、舌头和身体相连的大脑进行查询，摄取并识别信息。

大脑不能识别视觉信息。只有意识对视觉大脑进行采样、并将采集的信息与已知认知进行比较，最终产生新的视觉认知。这一结论是基于下面的事实。

第一，从眼睛到大脑，视觉信息是连续的，而观察者看见的却是有间隙的离散量。所以，视觉信息的终点不是大脑，而是意识。

第二，物体的颜色、形状、位置及运动等各种特征信息，传送到视觉大脑的时间是不同的。因此，视觉大脑不可能将这些不同步的特征信息绑定成一个整体。只有人的意识通过采样，将这些不同步的特征绑定成一个整体，再将新的信息与已知认知进行比较，最终产生新的视觉认知。

第三，视觉大脑组织的部分损伤，导致视觉功能的部分缺失，不能证明是大脑识别功能缺失所致。应该说是大脑处理视觉信息能力的缺失，导致意识不能摄取相关的视觉信息，从而使视觉认知功能的部分缺失。

第四，有人做过实验，让受试者戴上一种特殊的眼镜。将影像颠倒过来。开始时，受试者完全不能够适应。但经过一段时间后，视觉系统适应了眼镜，影像又正过来了，受试者便能够毫无困难地从事任何日常事务了。大脑处理视觉信

息是机械的，她是不能将影像颠倒过来的。经过训练后，意识能将影像正过来。可见，意识是视觉认知的终点。

还有许多众所周知的例子表明：大脑不能识别信息。只有意识才能识别信息。下面举一个例子，以作为上述论说的旁证。

人在深睡的状态下，他的耳朵、听觉神经及听觉大脑没有发生任何变化，可是，他听不到声音。这是因为，耳朵、听觉神经和听觉大脑组成的系统仅是一个听觉传感器。该传感器与意识一起组成人的听觉系统。其中，耳朵将声音转换为生物电信号，听觉神经将生物电信号传送到听觉大脑，听觉大脑以固定的算法对生物电信号进行格式化处理。但是，听觉大脑不能识别这些生物电信号。只有意识才能识别声音信息。当人清醒时，他的意识不断地查询他的听觉大脑[1,2,3]，不断地从听觉大脑采样，并对信息进行识别。因此，人能听到声音。人在深睡状态下，他的意识不查询他的听觉大脑。因此，人听不到声音。没有意识，就没有听觉。

3.2,高速视觉

3.2.1 高速视觉信息是离散的，是有间隙的

如实验一（c）所示，当电机转速为 500 rpm 时，观察者看见夹角为 30° 的 12 个扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。能看见高速旋转叶片的那就应该是高速视觉。高速视觉就像一台电影摄像机。她摄取一段信息，停一下，再摄取一段信息，再停一下，如此反复地进行这一过程。观察者看见高速旋转的叶片分别固定在某些角度，不旋转，表明高速视觉的摄取频率与电机的旋转频率形成某种同步。

依据上面的分析，本研究得出了如下高速视觉的工作机理。

意识不停地以扫描的方式查询与眼睛、耳朵、鼻子、舌头和身体分别相连的大脑，并摄取信息，识别信息[1,2,3]，如图 2 所示。当意识查询到高速视觉大脑时，高速视觉处于“拍摄态。”意识从高速视觉大脑中摄取一段信息。接着意识将摄取的信息与已知信息相比较，从而产生新的高速视觉认知。这时，人能看见眼前高速旋转的叶片。然后，意识离开高速视觉大脑，视觉处于“凝视态。”意识不摄取新的信息。这时，人便看不见眼前高速旋转的叶片。当电机旋转 30°后 ，意识又查询到高速视觉大脑，高速视觉又处于“拍摄态,”意识又从高速视觉大脑中摄取一段信息。然后，意识又离开高速视觉大脑，高速视觉又处于“凝视态。”可见，高速视觉认知信息最终是离散的，是有间隙的。“凝视态”时，眼识凝视着前面摄取的信息，因此，人感觉不到高速视觉认知信息的间隙。

3.2.2 高速视觉的频率特性

高速视觉“拍摄态”和“凝视态”的交替出现，使高速视觉具有了频率特性。实验一（c）表明：电机每旋转 30° ，意识摄取一段信息。电机旋转一周，意识共摄取 12 段信息。这样，意识对高速视觉大脑的拍摄频率与电机旋转频率形成了 12 倍频同步。

设电机转速为 n；电机旋转频率为 f；意识对高速视觉大脑的拍摄频率，简称“高速视觉频率”为 fh；高速视觉周期为 T_h。

则：由实验一（3）得：

$$f = \frac{n}{60} = \frac{500}{60} \approx 8.33\ (\text{Hz}) \qquad (1)$$

$$f_h = f \times 12 = 8.33 \times 12 \approx 100\ (\text{Hz}) \qquad (2)$$

$$T_h = \frac{1}{fh} = \frac{1}{100} = 10\ (\text{ms}) \qquad (3)$$

大量的实验证明 *fh*=100 Hz 是高速视觉唯一的工作频率。

下面两个测试方法证明从电机同步转速计算高速视觉频率 *fh* 是正确的。

一只红外发射管和一只红外接收管组成一个光电传感器，安装在旋转叶片的背景面上。每当叶片通过光电传感器时，光电传感器就会发出一个脉冲。在法兰上安装 12 片叶片，当电机转速为 500 rpm 时，人的高速视觉的拍摄频率是电机旋转频率的 12 倍。电机旋转一周，12 个叶片先后通过光电传感器，共发出 12 个脉冲。因此，一秒钟内光电传感器发出的脉冲数就等于高速视觉的拍摄频率。

“WT5518 视觉特性测试仪”使用一片 Microchip 18F45K80 作为主控芯片。光电传感器的输出端接 18F45K80 timer1 的输入端 T1CKI，并将 timer1 设置为计数器。将 timer0 设置为定时器，定时时间为 10 秒钟。每过 10 秒钟，timer0 就发出定时中断。18F45K80 收到中断后，读出 timer1 中的数据，并除以 10，这样，就得到了一秒钟内通过光电传感器的叶片个数，即：高速视觉的拍摄频率，结果是 99.8--100.1 Hz。

应用优利德数字存储示波器 UNI-T DIGITAL STORAGE OSCILLOSCOPE（UTD2102CEX ）对光电传感器的输出脉冲进行测试，结果是 99.3--100.5 Hz.

18F45K80 单片机测得的频率是 10 秒钟内的平均频率，因此，误差比较小。而示波器测得的频率是由两个相邻脉冲的时间间隔计算得到的即时频率，因此，误差比较大一点。

尽管两种测试方法不一样，误差不一样，根据电机同步转速计算得到的高速视觉频率 *fh* 总是这两种测量方法所测得的频率的中间值，因此，由电机同步转速计算得到的高速视觉频率是可信的。

3.2.3 人们的高速视觉认知行为是同步的

实验一（c）中，当电机转速为 500 rpm 沿顺时针方向旋转时，所有观察者看见 12 个扇形叶片分别固定在 12 个角度，不旋转。而且，所有参试者看见的 12 个角是相同的。这表明所有参试者同时进入“拍摄态”或“凝视态，”表明所有参试者的高速视觉认知行为是同步的。这也意味着人们的高速视觉认知行为是同步的。实验一（c）、（d）和（e）表明：如果有参试者的高速视觉认知频率存在 1/500 的偏差，他就不会看见 12 个扇形叶片分别固定在 12 个角度，不旋转，而是看见叶片在作顺时针方向旋转，如实验一（d）。或逆时针方向旋转，如实验一（e）。

人们的高速视觉认知行为是同步的，这表明人们的视觉认知行为受一个共用“视觉钟”定时。并且表明这个“视觉钟”不在人的体内，而在人的体外。本研究从视觉频率特性推知：“视觉钟”可能是一颗旋转频率为 50 Hz 的“脉冲星。”她旋转一周发出 2 个定时脉冲。也可能是两颗射线正交，旋转频率为 25 Hz 的“脉冲星。”她们旋转一周发出 4 个定时脉冲。就像“量子纠缠”那样，视觉意识与某“脉冲星”发出的脉冲之间存在某种“纠缠效应”。该“脉冲星”发出的脉冲使人们同时进入视觉“拍摄态，”使人们的视觉意识一起去查询视觉大脑。也就是说，该“脉冲星”发出脉冲为人们的视觉行为定时。

3.2.4 高速视觉信息暂存器

实验二中，设 n_k 为电机转速，设 k 为扇形叶片数，f_k,为电机旋转频率，当 n_k,满足下列关系式时：

$$n_k = \frac{fh \times 60}{k}$$

$$= \frac{6000}{k} \text{ (rpm)} \qquad (k = 1, 2, 3 \cdots\cdots) \qquad (4)$$

虽然只有 1 片长方形白色叶片在旋转，观察者却能看见 k 个扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。以 k = 8 为例，电机转速 n_8 = 6000 / 8= 750（rpm）。当电机转速为 750 rpm 时，虽然只有 1 片长方形白色叶片在旋转，观察者却能看见 8 个扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转，它们之间的夹角为 45°。观察者产生了视觉余像。

试验二表明：高速视觉中有一个“先进-先出”的“高速视觉信息暂存器”。意识不断地从高速视觉大脑中摄取信息，并将这些离散的信息存入“高速视觉信息暂存器”。电机旋转频率 f_8= n_8/ 60 = 12.5（Hz），而高速视觉摄取频率 f_h= 100 Hz，是电机旋转频率 f_8的 8 倍。所以，在单个叶片旋转一周中，意识共摄取 8 幅叶片画面。由于摄取的时间不同，相邻画面中的叶片互成 45°夹角。观察者看见 8 片扇形叶片分别固定在不同的角度，不旋转，它们之间的夹角为 45°，正是暂存器中 8 幅画面叠加的结果。由此可知，是“高速视觉信息暂存器”中离散信息的叠加导致了视觉余像。

“WT5518 视觉特性测试仪”显示该暂存器至少能同时存储 8 幅画面。进一步的研究可能会发现“高速视觉信息暂存器”具有更大的储存能力。

由实验三得出产生视觉错觉的一般表达式如下：

$$n_{i \times k} = \frac{fh \times 60}{i \times k}$$

$$= \frac{6000}{i \times k} \text{ (rpm)} \qquad (i \times k <= 120) \qquad (5)$$

式中，i 是安装在法兰上叶片的数量，k 是自然数，$n_{i \times k}$是电机的转速。当电机以 $n_{i \times k}$转速旋转时，观察者会看见 $i \times k$ 片扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。造成这种错觉的原理同实验二。如果 i = 1,公式（5）就成了公式（4），因此，公式（5）是高速旋转叶片产生视觉错觉的通用表达式。

设 i = 12，k = 1， 则 $n_{i \times k}$ = n_{12}= 6000/12 = 500 rpm。当电机以 500 rpm 旋转时，观察者会看见 12 片扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。这就是实验一（c）。为了阐明产生视觉错觉的机制，假设“高速视觉信息暂存器”的存储容量为 8。由于 12 个长方形白色叶片是相同的，所以，由这 12 个叶片组成的画面与旋转 30°后的画面也是相同的。所以，在叶片旋转中，意识摄取的画面是相同的。意识将摄取的画面按时间顺序存入“高速视觉信息暂存器”。暂存器中 8 个相同的画面的叠加，使观察者看见 12 片扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。

设 i = 12，k = 4，则 $n_{i \times k}$ = n_{48}= 6000/48 = 125 rpm。当电机以 125 rpm 旋转时，观察者会看见 48 片扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转，这就是实验一（b）。意识摄取频率是叶片旋转频率的 48 倍，所以，叶片旋转一周，意识共摄取 48 个画面。也就是说，叶片每旋转 7.5°，意识摄取一个画面。意识将摄

取的画面按时间顺序存入“高速视觉信息暂存器”。其中，第 1、5 画面是相同的，第 2、6 画面是相同，第 3、7 画面是相同的，第 4、8 画面是相同的。暂存器中四种画面的叠加，使观察者看见 48 片扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。

3.2.5 高速旋转叶片诱发顺时针慢速旋转错觉的原理

式（5）中，当电机以 $n_{i\times k}+\triangle n_{i\times k}$转速沿顺时针方向高速旋转时，观察者却看见叶片沿顺时针方向慢速旋转。令 $i=12$， $k=1$，则：$n_{12\times 1}+1=501$ (rpm)。当电机以 501 rpm 转速沿顺时针方向高速旋转时，由于高速视觉认知行为与电机旋转不同步，使得观察者看见叶片沿顺时针方向慢速旋转,如实验一（d）所示。

高速旋转叶片诱发顺时针慢速旋转的错觉，可用单叶片实验系统来解释。高速视觉处于“拍摄态”时，看见叶片在 A 处，如图 3 所示。然后，高速视觉处于“凝视态。”当高速视觉再回到“拍摄态”时，由于电机转速加快，叶片旋转已过了同步点 A 处，到了 B 处。由于$\angle\alpha>\angle\beta$，正如格式塔理论“小型性”原理那样[23]，高速视觉会将夹角为$\angle\beta$的两个叶片看成相关联的一个整体。因此，观察者认为叶片是从 A 处顺时针旋转$\angle\beta$到 B 处，叶片在作顺时针慢速旋转。

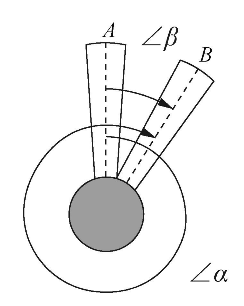


图 3. 顺时针慢速旋转错觉原理图

叶片沿着顺时针方向快速旋转，观察者看见叶片沿着顺时针方向慢速旋转。

3.2.6 高速旋转叶片诱发逆时针慢速旋转错觉的原理

式（5）中，当电机以 $n_{i\times k}-\triangle n_{i\times k}$转速沿顺时针方向高速旋转时，观察者却看见叶片沿逆时针方向慢速旋转。令 $i=12$， $k=1$，则：$n_{12\times 1}-1=499$ (rpm)。当电机以 499 rpm 转速沿顺时针方向高速旋转时，由于高速视觉认知行为与电机旋转不同步，使得观察者看见叶片沿逆时针方向慢速旋转，如实验一（e）所示。

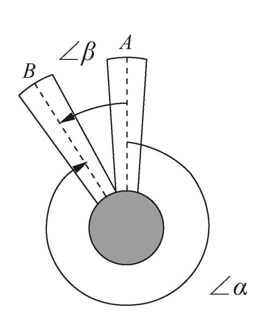


图 4. 逆时针慢速旋转错觉原理图

叶片沿着顺时针方向快速旋转，观察者看见叶片沿着逆时针方向慢速旋转。

高速旋转叶片诱发逆时针慢速旋转的错觉，可用单叶片实验系统来解释。

高速视觉处于“拍摄态”时，看见叶片在 A 处，如图 4 所示。然后高速视觉处于“凝视态。”当高速视觉再回到“拍摄态”时，由于电机转速下降，叶片旋转未到达同步点 A 处，只到达 B 处。由于 $\angle\alpha > \angle\beta$，正如格式塔理论“小型性”原理那样，高速视觉会将夹角为 $\angle\beta$ 的两个叶片看成相关联的一个整体。因此，参试者认为叶片是从 A 处逆时针旋转 $\angle\beta$ 到 B 处的，叶片在作逆时针慢速旋转。

3.2.7 高速视觉系统的特性

意识从高速视觉大脑中摄取画面时，叶片处于高速旋转中，因此，摄取的画面是在“拍摄态”内，叶片旋转形成的扇形面积，而不是叶片的真实形状。叶片面积越大，所拍摄的扇形画面越亮。

高速视觉能看见高速运动物体的位置和运动。然而，沿着运动方向，高速运动物体的视图会发生形变，或被拉伸，或被压缩。因此，人是看不清楚高速运动物体的真实形状的。

高速视觉中的 Parvocellular 视路系统就象一个带通滤速器。她仅让在一定范围内的高速运动视觉信息传送到高速视觉大脑，阻止静止和低速运动信息通过。当电机转速为 125 rpm 时，由于靠近法兰处叶片的线速度比外围的线速度低，因而首先被 Parvocellular 视路系统阻止，从高速视觉中消失。当转速为 62.5 rpm 时，扇形叶片完全从高速视觉中消失。

3.3 低速视觉

3.3.1 低速视觉与高速视觉的认知行为是同步的

实验四表明：低速视觉认知行为与高速视觉认知行为是同步的。依据高速视觉的工作原理，低速视觉的工作原理阐述如下：

当意识查询到低速视觉大脑时 [1, 2, 3]，低速视觉处于“拍摄态。”意识从低速视觉大脑中摄取一幅画面，并与已有认知比较产生新的低速视觉认知。这时，人能看见他眼前静止或低速旋转的叶片。当意识离开低速视觉大脑时，低速视觉处于“凝视态，”意识不摄取新的画面。这时，人便看不见眼前静止或低速旋转的叶片。意识再次查询低速视觉大脑时，低速视觉又处于“拍摄态，”意识又从低速视觉大脑中摄取一幅画面。然后，意识又离开低速视觉大脑，低速视觉又处于“凝视态。”因此，低速视觉认知信息最终也是离散的，是有间隙的。

低速视觉的工作频率也是 100Hz。因此，这个频率可视为整个视觉工作频率。

人们的低速视觉认知行为也是同步的。

3.3.2 低速视觉信息暂存器

低速视觉信息是离散的，是有间隙的，但是，人们并没有感觉到低速视觉信息的间隙。这表明存在一个“低速视觉信息暂存器。”实验四和实验一（b）的转速都是 125 rpm。实验四中安装了 48 片长方形白色叶片，参试者看见 48 片长方形白色叶片。实验一（b）中安装了 12 片长方形白色叶片，参试者看见 12 片长方形白色叶片，没有产生视觉余像。这表明“低速视觉信息暂存器”只能存储一个视觉信息。

3.3.3 低速旋转叶片诱发视觉错觉的原理

实验四和实验五（1）表明：电机的转速与叶片数量满足下列关系式时，观

察者便能看见 m 个长方形白色叶片固定在 m 个不同的角度，不旋转。

$$n_m = \frac{6000}{m} \text{ (rpm)} \qquad (48 <= m) \qquad (6)$$

公式（6）与公式（4）和（5）相同，不过，公式（4）中的 k 和公式（5）中的 $i \times k$ 包括视觉余像。公式（6）中的 m 只表示叶片的实际数。另外，m 必须大于等于 48。

实验五（a）、（b）、（c）表明：低速视觉产生视觉错觉的原理与高速视觉相同。

3.3.4 低速视觉的特性

低速视觉能接收、识别静止或低速运动物体的颜色、形状、运动、位置和深度等场景的全部信息，运动越慢，视觉越清晰。

低速视觉中的 Magnocellular 视路系统具有低通滤速功能。它只将静止和低速运动的信息传送到低速视觉大脑，阻止高速运动的信息通过。当电机转速在 0 — 62.5 rpm 时,观察者能看见 12 片长方形白色叶片沿顺时针方向旋转。当电机转速为 62.5 rpm 时，长方形白色叶片的外围部分，由于线速度大于内部，开始模糊。当电机转速为 500 rpm 时，长方形白色叶片完全从低速视觉中消失。

4 综述

人的视觉由低速视觉和高速视觉组成。视觉大脑分别对高、低速视路传来的信息进行格式化处理。意识分别从高、低速视觉大脑摄取信息并识别这些信息。两个视觉子系统相互独立，互不干涉。在某些速度下，这两个子系统有交集。意识以 100 Hz 的频率同时对低速视觉大脑和高速视觉大脑进行采样，并将其信息分别存入相应的“低速视觉信息暂存器”和“高速视觉信息暂存器”。然后，意识将“低速视觉信息暂存器”中的信息与已知信息相比较，产生新的低速视觉认知。将“高速视觉信息暂存器”中信息叠加的结果与已知信息相比较，产生新的高速视觉认知。当意识从高、低速视觉大脑摄取信息时，视觉进入“拍摄态。”这时，人能看见他周围的场景。当意识离开视觉大脑时，视觉进入“凝视态。”这时，意识不摄取信息，人便不能看见他周围的场景。因此，视觉认知信息是离散的，是有间隙的。视觉不断地凝视着前面的信息，因此，人感觉不到视觉信息的间隙。人们的视觉认知行为是同步的。高、低速视觉都会产生视觉错觉。只有高速视觉会产生视觉余像。

5 辅助信息

Video 1:**叶片在高速旋转，观察者却看见叶片不转的错觉（MP4）**

在“WT5518 视觉特性测试仪”的法兰上，安装 12 片长方形白色叶片，互成 30° 夹角。法兰的直径（D）= 8 cm；叶片长（L）= 11.3 cm；叶片宽（W）= 1.3 cm.

当电机转速设定为 500 rpm 时，实际转速与设定转速有时会有一点误差。当实际转速等于设定转速时，即：500 rpm 时，12 个长方形白色叶片完全消失。这时，所有参试者看见夹角为 30° 的 12 个相同的扇形叶片分别固定在某些角度，不旋转。并且，参试者所见的 12 个扇形叶片固定的角度是相同的，如 Video 1 所示。

https://pan.baidu.com/disk/main?from=homeFlow#/index?category=1

当实际转速略高于 500 rpm 时，所有参试者看见 12 个扇形叶片沿顺时针方向慢慢地

旋转，如 Video 2 所示。

https://pan.baidu.com/disk/main?from=homeFlow#/index?category=1

当实际转速略低于 500 rpm 时，所有参试者看见 12 个扇形叶片沿逆时针方向慢慢地旋转，如 Video 3 所示。

https://pan.baidu.com/disk/main?from=homeFlow#/index?category=1

由于电机实际转速不可能一直等于设定转速，因此，参试者一会儿看见高速旋转的叶片不转。一会儿看见叶片沿顺时针方向慢慢地旋转。一会儿看见叶片沿逆时针方向慢慢地旋转。

不管叶片如何转，参试者所见的结果是相同的。

在上面的三种情况中，12 个白色长方形叶片完全消失。

Video 2：**叶片沿顺时针方向高速旋转时，观察者却看见叶片沿顺时针方向慢速旋转的错觉（MP4）**

当电机转速为 501 rpm 沿顺时针方向旋转时，所有参试者看见 12 个扇形叶片沿顺时针方向慢慢地旋转，如 Video 2 所示。

https://pan.baidu.com/disk/main?from=homeFlow#/index?category=1

Video 3：**叶片沿顺时针方向高速旋转时，观察者却看见叶片沿逆时针方向慢速旋转的错觉（MP4）**

当电机转速为 499 rpm 沿顺时针方向旋转时，所有参试者看见 12 个扇形叶片沿逆时针方向慢慢地旋转，如 Video 3 所示。

https://pan.baidu.com/disk/main?from=homeFlow#/index?category=1

Video 4：**高、低速视觉认知行为同步的视频（MP4）**

在“WT5518 视觉特性测试仪”的法兰上，安装 48 片长方形白色叶片。法兰的直径（D）= 8 cm；叶片长（L）= 11.3 cm；叶片宽（W）= 0.4 cm，如图 1 所示。

当电机的转速为 125 rpm 时，所有参试者同时看见 48 个长方形白色叶片和 48 个扇形叶片。并且，它们完全重叠，分别固定在 40 个角度，不旋转，如 Video 4 所示。

https://pan.baidu.com/disk/main?from=homeFlow#/index?category=1

Video 5：**低速视觉产生错觉的视频（MP4）**

在“WT5518 视觉特性测试仪”的法兰上，安装 100 片长方形白色叶片，互成 3.6° 夹角。法兰的直径（D）= 13 cm；叶片长（L）= 8.8 cm；叶片宽（W）= 0.4 cm，如图 1 所示。

当电机的转速为 60 rpm 时，所有参试者看见 100 个长方形白色叶片分别固定在 100 个角度，不旋转，如 Video 5 所示。

https://pan.baidu.com/disk/main?from=homeFlow#/index?category=1

参考文献

[1] 赖永海，刘鹿鸣。《楞严经》[M]。中华书局 （2015）。

“眼能显色，如是见性，是心非眼。”

[2] 赖永海，刘鹿鸣。《金光明经》[M]。中华书局 （2016）。
“心识二性，躁动不停”;“驰骋六情，而常妄想，分别诸法。”
[3] 赖永海，尚 荣。 《坛经》[M]。中华书局 （2011）。
“不是风动，不是幡动，仁者心动。”
[4] 李 铭《视觉原理》[M]。世界图书出版公司 (2012)
[5] Livingstone MS. & Hubel DH.
Segregation of form, color, movement, and depth-anatomy, physiology, and perception[J].
Science 1988 240:740-749.
https://www.science.org/doi/10.1126/science.3283936
[6] Hubel DH & Livingstone MS
Segregation of form, color, and stereopsis in primate Area-18[J].
Neuroscience 1987 7: 3378-3415.
https://www.jneurosci.org/content/7/11/3378
[7] Martin PR. & Solomon SG.
The koniocellular whiteboard[J].
Comparative neurology 2019 527:505-507.
DOI: 10.1002/cne.24426
[8] Martin PR., White AJR., Goodchild AK., Wilder HD & Sefton AE.
Evidence that blue-on cells are part of the third geniculocortical pathway in primates[J].
European Journal of Neuroscience 1997 9:1536-1541.
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1460-9568.1997.tb01509.x
[9] Moutoussis K. & Zeki S.
A direct demonstration of perceptual asynchrony in vision[J].
Proceedings of the Royal Society B-biological Sciences 1997 264:393-399.
[10] Moutoussis K. & Zeki S.
Functional segregation and temporal hierarchy of the visual perceptive systems[J].
Proceedings of the Royal Society B-biological Sciences 1997 264:1407-1414.
[11] Gegenfurtner KR.
Cortical mechanisms of colour vision[J].
Nat Rev Neurosci 2003 4:563-572.
https://www.nature.com/articles/nrn1138
[12] Zeki S.
A massively asynchronous, parallel brain[J].
Philosophical Transactions of the Royal Society B-biological 2015 370:103-116.
DOI: 10.1098/rstb.2014.0174
[13] Zeki S.
Parallel processing, asynchronous perception, and a distributed system of consciousness in vision[J].
Neuroscientist 1998 4:365-372.
https://doi.org/10.1177%2F107385849800400518
[14] Zeki S. & Bartels A.

The autonomy of the visual systems and the modularity of conscious vision[J].
Philosophical Transactions of the Royal Society B-biological Sciences 1998 353:1911-1914.
https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0343
[15] Al-Hashmi, Amal M., Kramer, Daniel J., Mullen,Kathy T.
Human vision with a lesion of the parvocellular pathway: an optic neuritis model for selective contrast sensitivity deficits with severe loss of midget ganglion cell function[J].
Experimental brain research 2011 215:293-305.
https://link.springer.com/article/10.1007/s00221-011-2896-4
[16] Anssari Neda, Vosoughi Reza, Mullen Kathy, Mansouri Behzad
Selective Colour Vision Deficits in Multiple Sclerosis at Different Temporal Stages[J].
Neuro-Ophthalmology 2020 44:16-23.
https://doi.org/10.1080/01658107.2019.1615960
[17] Moura, AL., Teixeira, RA., Oiwa, NN., et al.
Chromatic discrimination losses in multiple sclerosis patients with and without optic neuritis using the Cambridge color test[J].
Visual neuroscience 2008 25:463-468.
https://doi.org/10.1017/S0952523808080437
[18] Bartels, A., Zeki, S.
The theory of multistage integration in the visual brain[J]. Proceedings of the royal society B-biological sciences 1998 265:2327-2332.
https://doi.org/10.1098/rspb.1998.0579
[19] Ziek, S., Ffytche, DH.
The Riddoch syndrome: insights into the neurobiology of conscious vision[J].
Brain 1998 121:25-45.
https://doi.org/10.1093/brain/121.1.25
[20] Armin Zlomuzica and Ekren Dere
Towards an animal model of consciousness based on the platform theory[J].
Behavioural Brain Research 2022 419:113695.
https://doi.org/10.1016/j.bbr.2021.113695
[21] Fang Fang & Hailan Hu
Recent progress on mechanisms of human cognition and brain disorders[J].
Sci China Life Sci 2021 64(6):843-846.
https://doi.org/10.1007/s11427-021-1938-8
[22] Shaofei Wu, Mingqing Wang & Yuntao Zou
Bidirectional cognitive computing method supported by cloud technology[J].
Cognitive Systems Research 2018 52:615-621.
https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.07.035
[23] Helson H.
The psychology of Gestalt[J].

American journal of psychology 1926 37:25-62.
https://doi.org/10.2307/1414080